

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.267

# 空港新城夏季臭氧及其前体物污染特征分析

梁俊宁<sup>1</sup>, 王浩<sup>1</sup>, 芮守娟<sup>2</sup>, 刘杰<sup>1</sup>, 汪平<sup>1</sup>

(1. 陕西省环境科学研究院, 西安 710061; 2. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054)

**摘要:**针对陕西省西咸新区空港新城夏季臭氧质量浓度较高的问题,开展了臭氧及其前体物(氮氧化物、挥发性有机物)监测工作,分别监测 3 种污染物的质量浓度小时值,监测时间为 2018 年 7 月 27 日 00:00 时至 8 月 26 日 23:00 时,共 31 d。根据监测结果,西咸新区空港新城在夏季(7—8 月)臭氧质量浓度总体偏高,观测期间平均质量浓度为 103.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最大质量浓度达 306  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,研究期间有 16 d 分别出现了臭氧小时质量浓度值超标现象;空港新城臭氧质量浓度日变化呈单峰趋势,最大值出现在下午 17:00 左右,最小值出现在上午 6:00 左右;臭氧与其前体物均呈现负相关关系,其相关系数分别为  $-0.6487$ 、 $-0.0911$ ,当  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  小于 6.43 时,  $\text{VOCs}$  对臭氧的生成起主导作用,而当  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  大于 6.43 时,则  $\text{NO}_x$  对臭氧的生成起决定性影响。

**关键词:** 空港新城; 臭氧; EKMA 曲线; 相关性分析

中图分类号: X511; X831

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)10-114-07

## Characteristics analysis of ozone and its precursors in midsummer at Airport New City of Xi-Xian New Area, Shaanxi Province, China

LIANG Junning<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, RUI Shoujuan<sup>2</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an 710061, P. R. China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, P. R. China)

**Abstract:** This paper is aimed at studying of high concentration ozone events in summer in Airport New City (ANC) of Xi-Xian New Area, Shaanxi Province. Online instruments were used to continuously monitor the hourly concentration of ozone and its precursor (nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) and volatile organic compounds ( $\text{VOCs}$ )) in ANC from 27 July to 26 August 2018(31 days). The results show that the ozone concentration is generally high during the midsummer (July & August) at ANC, and the average concentration is 103.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  and the maximum concentration reaches 306  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . There are 16 days when the ozone concentration exceeds the limit during the study period and its diurnal variation of concentration shows a single peak trend, with the maximum value about 17:00 p.m. and the minimum value around 6:00 a.m. The correlation coefficient between ozone and  $\text{NO}_x$  is  $-0.6487$ , and that between ozone and  $\text{VOCs}$  is  $-0.0911$ . When  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  is below 6.43,  $\text{VOCs}$  play a leading role in the generation of ozone, and when  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  is above 6.43,  $\text{NO}_x$  plays a decisive role in the generation of ozone.

**Keywords:** Airport New City; ozone; EKMA curve; correlation analysis

收稿日期: 2019-10-29 网络出版日期: 2020-01-09

基金项目: 陕西省重点研发计划重点产业链(群)项目(2018ZDCXL-SF-02-05); 国家重点研发计划项目(2017YFC0212206)。

Supported by Shaanxi Province Key Research and Development Plan Key Industrial Chain (Group) Project (2018ZDCXL-SF-02-05) and the National Atmospheric Research Program(2017YFC0212206).

作者简介: 梁俊宁(1979—),男,高级工程师,主要研究方向为大气污染控制,(E-mail)ljntb@163.com。

臭氧(O<sub>3</sub>)是大气中重要的痕量组分之一,其主要集中在平流层,对流层中的含量仅占整个大气层臭氧总量的 10%左右<sup>[1]</sup>。虽然臭氧在平流层起到了保护人类与环境的重要作用,但在对流层质量浓度增加则会对人体健康产生有害影响<sup>[2,3]</sup>,因为臭氧具有强烈的刺激性,可对人体呼吸道、心血管、神经系统、眼睛和皮肤造成伤害,并会影响血液输氧功能、使甲状腺功能受损、骨骼钙化,还可诱发淋巴细胞染色体畸变,损害某些酶的活性和产生溶血反应等<sup>[4,5]</sup>。臭氧还是一种反应性极高的强氧化剂,能使橡胶开裂,伤害植物叶子<sup>[6,7]</sup>,并使大气能见度降低;形成条件是强日光和低湿度,其质量浓度高峰一般出现在中午或午后。近年来,随着中国城市化和机动车保有量的快速增长,大量的汽车尾气和工业排放中的氮氧化物和有机物在太阳光与热作用下经化学反应形成臭氧。臭氧污染主要形成于市区及市郊,并在有利气象条件输送到外围地区。臭氧质量浓度的升高与超标问题已成为我国大多数城市的新的环境问题<sup>[8-11]</sup>,刘娇娇等<sup>[12]</sup>研究发现重庆市近地面层臭氧受其前体物与气象条件影响明显;王佳颖等<sup>[13]</sup>、王占山等<sup>[14]</sup>分别对北京市夏季臭氧的变化特征与其前体物的关系进行了研究,发现北京市臭氧高质量浓度多在 5—8 月,且主要受 VOC 控制;夏思佳等<sup>[15]</sup>对江苏省 13 市 O<sub>3</sub> 污染时空分布特征进行统计分析;伏志强等<sup>[16]</sup>对长沙市夏季臭氧与其前体物关系研究发现,5 月份臭氧受 NO<sub>x</sub> 控制,9 月份受 VOC 控制。目前,国内外专家学者对对流层臭氧的生成条件、化学反应机理、对人体健康和生态系统的影响、污染监测和控制等方面取得了显著的效果<sup>[17-22]</sup>。

陕西省西咸新区空港新城作为全省主要交通枢纽中心,以西安咸阳国际机场为核心,着力打造以西安国家航空实验区为统领,建设丝路交通商贸物流中心、国际航空服务业聚集中心、国际文化创意中心、生态和农业小镇示范中心。随着西咸国际机场规模扩大及区域交通物流的快速发展,机动车的增加等,造成该区域臭氧前体物(氮氧化物和挥发性有机物)排放量增加。同时,该区域地势平坦,相对海拔高度较高,太阳直射能力强,紫外辐射强度与辐射指数均比较高。合适的地形、气象及污染源条件使得该区域更容易发生光化学反应,从而使臭氧质量浓度升高,Li 等<sup>[23]</sup>发现生物质和人为源排放是关中地区近地面层臭氧质量浓度升高的重要因素;刘松等<sup>[24]</sup>通过对西安市 2013—2016 年臭氧变化趋势分析发现,西安市臭氧质量浓度呈现逐年上升趋势,臭氧质量浓度受光化学影响明显,同时来自秦岭的植物 VOC 排放对于西安臭氧质量浓度影响较大。笔者主要针对西咸新区空港新城夏季臭氧质量浓度偏高问题,在空港新城设置一个观测点,通过对臭氧及其前体物(氮氧化物和挥发性有机物)小时质量浓度监测结果,分析臭氧质量浓度变化特点及其前体物对臭氧形成的影响。

## 1 观测点与仪器介绍

### 1.1 观测点描述

为获取空港新城夏季臭氧及其前体的质量浓度水平,在空港新城北杜中学(108°42',34°28')建立了环境监测点(图 1)。臭氧、氮氧化物和挥发性有机化合物仪器位于 3 楼。场地距离西安咸阳国际机场西北侧约 5 km。观测时间为 2018 年 7 月 27 日 00:00 时至 2018 年 8 月 26 日 23:00(共 31 d)。观测期间该站点的温度范围从 19.0 °C 至 38.1 °C,而相对湿度在 37%~94%之间,更高的湿度主要是受到降水天气的影响。平均风速接近 1.4 m/s 和平均气压 948.3 hPa。紫外线辐射在 0~103 W/m<sup>2</sup>之间,平均值为 22.7 W/m<sup>2</sup>。

### 1.2 仪器介绍

臭氧与氮氧化物使用美国热电公司生产的在线连续观测仪。其中,臭氧使用 Thermo Scientific Model 49i 臭氧分析仪,氮氧化物使用 Thermo Scientific 42i-D 氮氧化物分析仪。

VOC 监测使用武汉天虹公司生产的大气环境挥发性有机物在线监测系统(TH-300b),对 VOCs 进行连续监测,采样频率为 1 h。环境空气样品通过采样泵抽入压缩系统,VOCs 组分被冷冻捕集并进行热解吸后进入气相色谱分析系统,通过不同的色谱柱进行分离,利用不同的检测器进行定量测量,其中 C2~C5 等低碳组分捕集阱为 PLOT(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/KCl)色谱柱(内径 0.53 mm,长度 15 m),分离柱为 PLOT(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/KCl)(内径 0.32 mm,长度 15 m),气体采用氢火焰离子化检测器(FID)进行定量分析;卤代烃、含氧挥发性有机物和 C6~C12 碳氢化合物捕集阱为去活石英空管(内径 0.53 mm,长度 15 m),分离柱为 DB-624(内径 0.25 mm,长度 30 m),利用四极杆质谱检测器(MSD)进行定量分析。

为确保仪器正常使用,所有观测仪器均在检修质保期内,并在使用前均采用标准物质进行了校准。

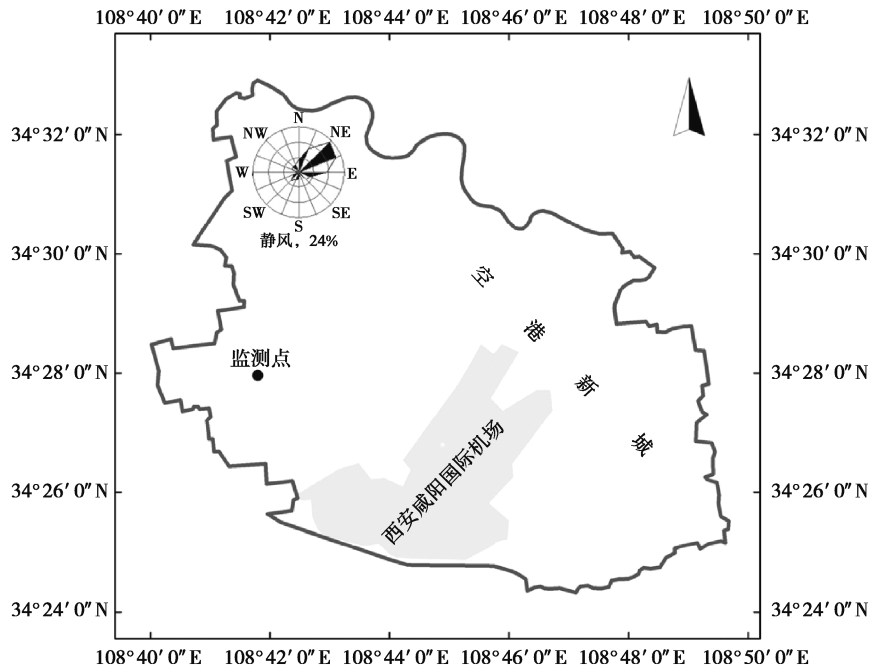


图 1 空港新城大气环境观测点位示意图

Fig. 1 The location of observation site at ANC

### 1.3 数据与分析

试验监测过程中一共获取了有效监测数据 81 840 个,包括  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$  和 VOCs 组分,其中 VOCs 监测了 28 种烷烃、11 种烯烃、17 种芳香烃以及 34 种卤代烃等组分,基本包括  $\text{O}_3$  重要前体物 PANs、要求监测的 57 种 VOCs 及美国 EPA 方法要求的 65 种 VOCs 组分质量浓度。试验所得数据全部合理可用,数据分析使用软件 SPSS18.0 进行处理,并使用 origin Pro8 软件绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 臭氧及其前体物质量浓度变化特征

空港新城夏季(7—8月)臭氧 8 h 滑动平均值(臭氧质量浓度小时值)及其前体物质量浓度变化如图 2 所示。

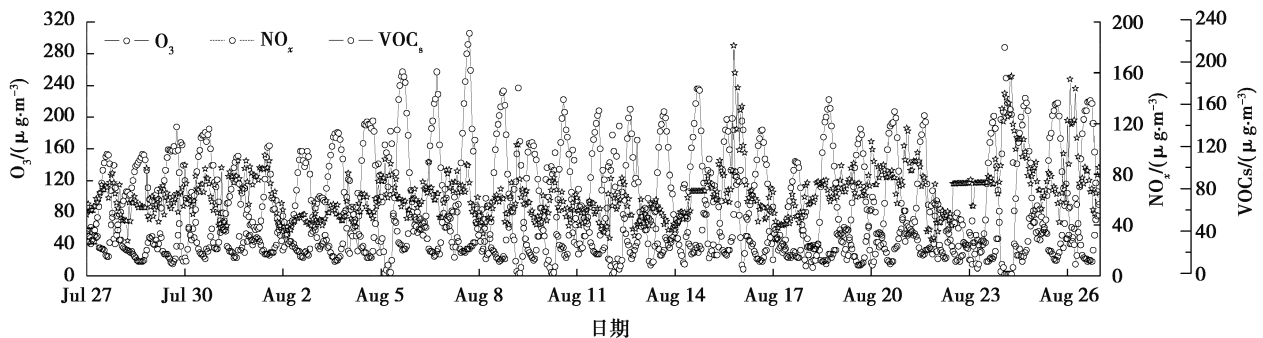


图 2 臭氧及其前体物(氮氧化物、挥发性有机物)小时质量浓度变化曲线图

Fig. 2 The figure of the hourly concentration of ozone and its prerequisites ( $\text{NO}_x$  and VOCs)

从图 2 可以看出,监测期间空港新城臭氧 8 h 滑动平均值在  $2.0 \sim 306.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  之间,平均为  $103.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其最大小时均值质量浓度为  $306.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (8月7日)超过环境空气质量标准(GB 3095—2012)中臭氧 1 h 平均质量浓度限值( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )的 0.53 倍;臭氧日最大 8 h 平均值在  $79.0 \sim 245.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  之间,有 23 d 臭氧日最大 8 h 平均值超过标准( $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。高质量浓度值主要出现在 12:00—19:00 时,在不考虑降水天气影

响下,该时段 8 h 滑动平均值在  $7.01\sim 306.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均为  $165.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

空港新城氮氧化物质量浓度水平整体上比较稳定,其小时质量浓度变化范围为  $8.0\sim 180.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均  $34.1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ , $\text{NO}_2$  日均值为  $18.9\sim 66.1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均  $34.1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,研究期间小时值和日均值均未超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中的二级标准值( $80\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $200\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。日均值变化趋势与  $\text{O}_3$  相反,在上午 07:00 质量浓度最高,之后开始出现下降,至下午 15:00 左右达质量浓度最低值并维持一段时间,在夜间 21:00 后开始上升直至次日 07:00 达到最大。

VOCs 小时质量浓度值变化范围在  $30.4\sim 215.6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  之间,平均值  $74.8\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,日均值质量浓度值变化范围在  $62.4\sim 137.3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  之间,平均值  $103.4\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。VOCs 小时值变化特征表现为双峰型,峰值分别出现在凌晨 0:00 和上午 8:00。这主要是由于日落后气温明显降低,大气光化学反应能力下降,VOCs 排放不断累积而导致夜间质量浓度较高。上午 8:00 后,随着温度的升高,VOCs 在高温及光照作用下发生光化学反应,导致其质量浓度逐渐降低。

## 2.2 臭氧质量浓度日变化特征

图 3 是不同气象条件下臭氧质量浓度的日变化曲线图。为充分了解在不同天气状态下,环境空气中臭氧质量浓度的日变化特征,分别选取了晴天、多云天气和阴雨天气典型日进行研究,其中 8 月 7 日代表晴天,8 月 17 日代表多云天气,8 月 22 日代表阴雨天气,当日降水量为 19.2 mm。

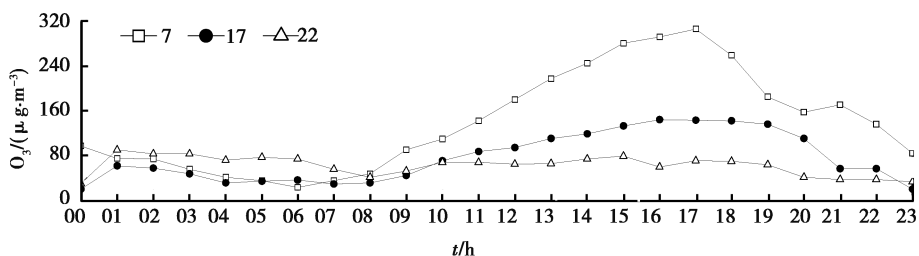


图 3 不同天气条件下臭氧小时质量浓度变化图

Fig. 3 Variation of ozone concentration under different weather conditions

由图 3 可以看出,不论在何种天气条件下,空港新城  $\text{O}_3$  质量浓度日变化趋势较为一致,呈现单峰曲线,这与国内其他城市的研究结果基本一致<sup>[8,10,13-15]</sup>。其在 00:00—08:00 时臭氧质量浓度较低且变化幅度不大,上午 09:00 时开始质量浓度逐渐升高,并在 17:00 时左右达到峰值,之后开始下降。主要是由于其前体物  $\text{NO}_x$  在上午 07:00 时达到质量浓度最大值,加之空港新城日出时间一般在清晨 08:00 左右,之后气温开始逐渐升高,太阳辐射也不断增强,这些有利于  $\text{O}_3$  形成的光化学反应也随之开始进行, $\text{O}_3$  质量浓度在上午 09:00 开始升高,并在下午 17:00 左右达到峰值。随着光化学反应的深入进行,臭氧质量浓度达到最大值而前体物质量浓度逐渐减少,最终达成一种动态平衡关系。之后受太阳光照角度的影响,太阳辐射逐渐减弱、气温也随之降低,产生  $\text{O}_3$  的条件变得不十分有利,同时受近地面沉积作用影响,造成近地面  $\text{O}_3$  消耗进而使得  $\text{O}_3$  质量浓度维持在一个较低水平。

$\text{O}_3$  质量浓度在不同天气条件下的质量浓度峰值差异比较大,其中晴天最高,其次多云天气,阴雨天最低。晴天时臭氧质量浓度在正午前后出现快速升高趋势,并在 17:00 点达到峰值,而多云天气和阴雨天气条件下的臭氧质量浓度增幅较低且峰型比较平滑,其峰值持续时间维持在 15:00—20:00 时之间。相较于晴天,多云与阴雨天气条件下午后臭氧质量浓度变化幅度较小。不同天气条件夜间  $\text{O}_3$  质量浓度均处于较低水平,但日间  $\text{O}_3$  质量浓度峰值在晴天条件下分别是多云和阴雨天气条件下的 2~3 倍。

## 2.3 臭氧与其前体物相关性分析

对流层臭氧的形成与其前体物直接相关,其中  $\text{NO}_x$  和 VOCs 是臭氧的主要前体物。臭氧与其前体物之间的相互作用可以通过分析它们之间的相关性来发现。图 4 为空港新城臭氧及其前体物的相关分析图。

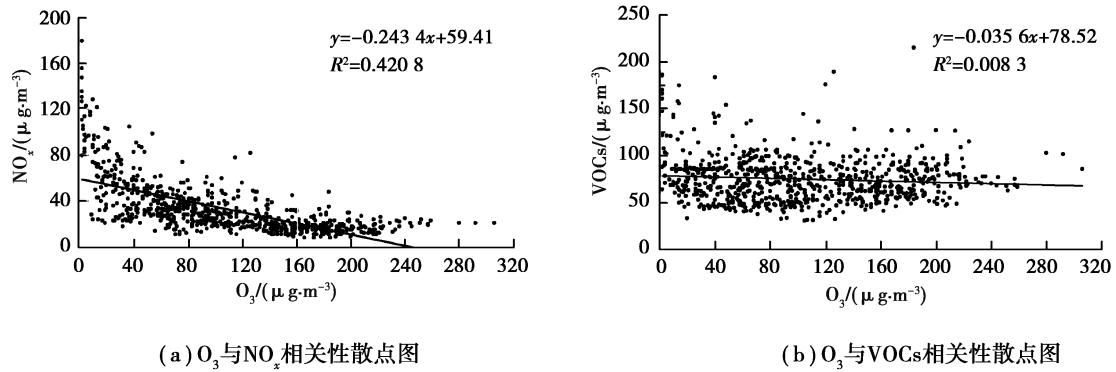


图 4 臭氧与其前体物相关性分析图

Fig. 4 Correlation analysis of ozone concentration and its precursor concentration

从图 4 中可以看出,臭氧与其前体物  $\text{NO}_x$  和  $\text{VOCs}$  均呈负相关关系,其相关系数分别为  $-0.6487$ 、 $-0.0911$ ,说明臭氧质量浓度的生成是以氮氧化物和挥发性有机物的消耗为前提的,即氮氧化物与挥发性有机物通过光化学反应生成臭氧,从而导致臭氧质量浓度的升高和其前体物质量浓度的降低。

#### 2.4 臭氧生成等质量浓度曲线

目前,科学界普遍认为臭氧生成可以通过经验动力学模型方法(EKMA)来理解,它可以显示臭氧与其前体( $\text{NO}_x$ 和 $\text{VOCs}$ )之间的复杂关系。一般来说,当 $\text{VOCs}/\text{NO}_x$ 偏大时,臭氧生成处于 $\text{NO}_x$ 控制区,臭氧质量浓度随 $\text{NO}_x$ 增加而增加, $\text{VOCs}$ 的变化对臭氧的影响不大;反之,当 $\text{VOCs}/\text{NO}_x$ 比值较小时,臭氧生成处于 $\text{VOCs}$ 控制区,臭氧质量浓度随 $\text{VOCs}$ 增加而增大, $\text{NO}_x$ 质量浓度增加反而会使臭氧质量浓度降低。由于降雨天气与夜间臭氧质量浓度较低,其前体物几乎不发生化学反应,因此这里在绘制EKMA曲线过程中剔除了阴雨天气与夜间的低值,选择每天08:00—22:00数据绘制空港新城夏季臭氧生成EKMA曲线,结果如图5所示。

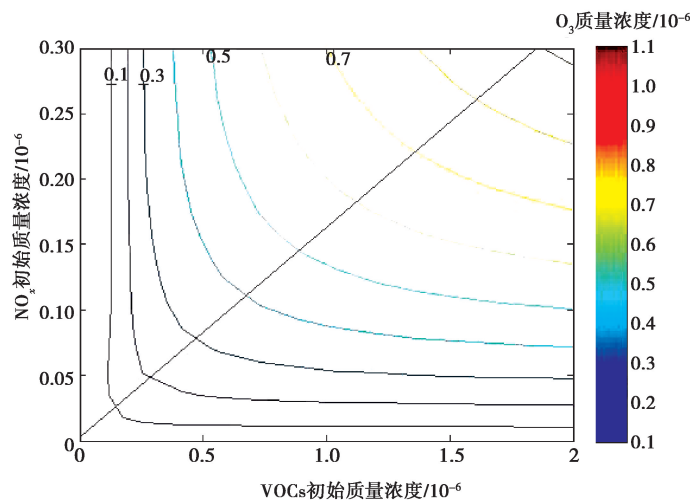


图 5 空港新城臭氧生成等质量浓度曲线

Fig. 5 Ozone production isoconcentration curve of Airport New City

由图 5 可以看出  $\text{NO}_x$  和  $\text{VOCs}$  与臭氧并不是简单的线性关系,图中各质量浓度转折点连成的脊线上  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  相同,即  $k=6.43$ 。当  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  比值小于  $k$  时,属于  $\text{VOCs}$  控制区,当  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  比值大于  $k$  时,属于  $\text{NO}_x$  控制区。对本研究期间  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  比值进行计算,结果显示,空港新城地区夏季  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  比值范围在  $0.37\sim 10.68$  之间,其中小于  $6.43$  的时间数(409 h)占总观测时间(435 h)的 94%,只有 6%的时间大于  $6.43$ ,且大都出现在 11:00—18:00 时间段(正好是臭氧质量浓度高值期间)。可见空港新城臭氧质量浓度整体上受  $\text{VOCs}$  影响,但在正午期间,随着氮氧化物质量浓度的不断增加,在有利气象因素的影响下,臭

氧质量浓度受氮氧化物影响比较明显。这就说明,在空港新城地区主要以控制区域 VOCs 排放为主,而在 11:00—18:00 时间段,VOCs 质量浓度改变时对 O<sub>3</sub> 的影响不大,降低 NO<sub>x</sub> 排放量会使 O<sub>3</sub> 质量浓度明显降低,因此该时段在控制 VOCs 的基础上应重点控制氮氧化物的排放,才能有效降低该区域的 O<sub>3</sub> 质量浓度。空港新城夏季臭氧日变化受前体物的控制与北京市<sup>[14]</sup>、长沙市<sup>[16]</sup>有所不同,其中北京市主要受 VOC 控制,而长沙市 5 月份受 NO<sub>x</sub> 控制,9 月份受 VOC 控制。

### 3 结 论

1) 陕西省西咸新区空港新城夏季臭氧质量浓度在 2~306 μg/m<sup>3</sup> 之间,平均为 103.8 μg/m<sup>3</sup>,臭氧质量浓度值较高时段主要集中在 12:00—19:00 时,O<sub>3</sub> 质量浓度日变化呈单峰型分布,在 00:00—08:00 臭氧质量浓度较低且变化幅度不大,从上午 09:00 时开始质量浓度逐渐升高,并在 17:00 左右达到峰值,之后开始下降。NO<sub>x</sub> 小时质量浓度变化范围为 8~180 μg/m<sup>3</sup>,平均值 34.1 μg/m<sup>3</sup>,NO<sub>x</sub> 日变化趋势与 O<sub>3</sub> 相反,其在上午 07:00 质量浓度最高,在下午 15:00 左右达质量浓度最低值。VOCs 质量浓度变化范围分别为 30.4~215.6 μg/m<sup>3</sup>,平均值为 74.8 μg/m<sup>3</sup>,VOC 质量浓度峰值分别出现在凌晨 0:00 和上午 8:00。

2) 臭氧与其前体物 NO<sub>x</sub> 和 VOC 均呈负相关关系,其相关系数分别为 -0.648 7、-0.091 1,说明臭氧质量浓度的生成是以氮氧化物和挥发性有机物的消耗为前提的。

3) 空港新城地区夏季 VOCs/NO<sub>x</sub> 比值范围在 0.37~10.68 之间( $k=6.43$ ),其中小于  $k$  值的时间超过 94%,证明空港新城臭氧质量浓度整体上受 VOCs 影响,但在 11:00—18:00 期间,其比值均大于 6.43,氮氧化物对臭氧的生成起到关键作用。

#### 参考文献:

- [1] Ball W T, Alsing J, Mortlock D J, et al. Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18: 1379-1394.
- [2] Turner M C, Jerrett M, Pope C A III, et al. Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study[J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2016, 193(10): 1134-1142.
- [3] Sadiq M, Tai A P K, Lombardozzi D, et al. Effects of ozone-vegetation coupling on surface ozone air quality via biogeochemical and meteorological feedbacks[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 17(4): 3055-3066.
- [4] Brook R D, Brook J R, Urch B, et al. Inhalation of fine particulate air pollution and ozone causes acute arterial vasoconstriction in healthy adults[J]. *Circulation*, 2002, 105: 1534-1536.
- [5] Fiscus E L, Booker F L, Burkey K O B. Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2005, 28: 997-1011.
- [6] Fowler D, Pilegaard K, Sutton M A, et al. Atmospheric composition change: ecosystems-atmosphere interactions [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(33): 5193-5267.
- [7] Kumar P, Imam B. Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 444: 85-101.
- [8] 邵平, 安俊琳, 杨辉, 等. 南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征[J]. *环境科学*, 2014, 35(11): 4031-4043.  
SHAO Ping, AN Junlin, YANG Hui, et al. Variation characteristics of surface ozone and its precursors during summertime in Nanjing northern suburb[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(11): 4031-4043.(in Chinese)
- [9] Wang R, Xu X B, Jia Sh H, et al. Lower tropospheric distributions of O<sub>3</sub> and aerosol over Raoyang, a rural site in the North China Plain[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 17(6): 3891-3903.
- [10] 严仁嫦, 叶辉, 林旭, 等. 杭州市臭氧污染特征及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(3): 1128-1136.  
YAN Renchang, YE Hui, LIN Xu, et al. Characteristics and influence factors of ozone pollution in Hangzhou[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(3): 1128-1136.(in Chinese)
- [11] Shen L, Jacob D J, Liu X, et al. An evaluation of the ability of the ozone monitoring instrument (OMI) to observe boundary layer ozone pollution across China: application to 2005-2017 ozone trends[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19: 6551-6560.

- [12] 刘姣姣, 蒋昌潭, 宋丹, 等. 重庆夏季近地面臭氧变化规律及影响因素分析[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(8): 91-98.  
LIU Jiaojiao, JIANG Changtan, SONG Dan, et al. Analysis of distribution characteristics of surface ozone and its influencing factors in summer in Chongqing[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(8): 91-98.(in Chinese)
- [13] 王佳颖, 曾乐薇, 张维昊, 等. 北京市夏季臭氧特征及臭氧污染日成因分析[J]. 地球化学, 2019, 48(3): 293-302.  
WANG Jiaying, ZENG Lewei, ZHANG Weihao, et al. Characteristics and causes of summer ozone pollution in Beijing City[J]. Geochimica, 2019, 48(3): 293-302. (in Chinese)
- [14] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3001-3008.  
WANG Zhanshan, LI Yunting, CHEN Tian, et al. Analysis on diurnal variation characteristics of ozone and correlations with its precursors in urban atmosphere of Beijing[J]. China Environmental Science, 2014, 34(12): 3001-3008. (in Chinese)
- [15] 夏思佳, 赵秋月, 刘倩. 江苏省臭氧时空分布及其前体物影响特征研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(9): 96-100, 133.  
XIA Sijia, ZHAO Qiuyue, LIU Qian. Pollution characteristics of ozone and impacts of its precursors in Jiangsu Province[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(9): 96-100, 133.(in Chinese)
- [16] 伏志强, 戴春皓, 王章玮, 等. 长沙市夏季大气臭氧生成对前体物的敏感性分析[J]. 环境化学, 2019, 38(3): 531-538.  
FU Zhiqiang, DAI Chunhao, WANG Zhangwei, et al. Sensitivity analysis of atmospheric ozone formation to its precursors in summer of Changsha[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(3): 531-538. (in Chinese)
- [17] Alghamdi M A, Khoder M, Harrison R M, et al. Temporal variations of O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> in the urban background atmosphere of the coastal city Jeddah, Saudi Arabia[J]. Atmospheric Environment, 2014, 94: 205-214.
- [18] An J L, Shi Y Z, Wang J X, et al. Temporal variations of O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> in the urban background atmosphere of Nanjing, east China[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, 71(2): 224-234.
- [19] Lopo A B, Spyrides M H C, Lucio P S, et al. Ozone and aerosol influence on ultraviolet radiation on the east coast of the Brazilian northeast[J]. Atmospheric and Climate Sciences, 2014, 4(1): 92-99.
- [20] Zou Y, Deng X J, Zhu D, et al. Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> at a suburban site in Guangzhou, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15: 6625-6636.
- [21] Latif M T, Dominick D, Fatimah A, et al. Seasonal and long-term variations of surface ozone concentrations in Malaysian Borneo[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573: 494-504.
- [22] Kalabokas P, Hjorth J, Foret G, et al. An investigation on the origin of regional springtime ozone episodes in the western Mediterranean[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(6): 3905-3928.
- [23] Li N, He Q Y, Greenberg J, et al. Impacts of biogenic and anthropogenic emissions on summertime ozone formation in the Guanzhong Basin, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18: 7489-7507.
- [24] 刘松, 程燕, 李博伟, 等. 2013—2016年西安市臭氧时空变化特性与影响因素[J]. 地球环境学报, 2017, 8(6): 541-551.  
LIU Song, CHENG Yan, LI BOWEI, et al. Characteristics of temporal and spatial variations of ozone and its influencing factor over Xi'an during 2013—2016[J]. Journal of Earth Environment, 2017, 8(6): 541-551. (in Chinese)

(编辑 郑洁)